

(12)特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関  
国際事務局



(43) 国際公開日  
2004 年 1 月 22 日 (22.01.2004)

PCT

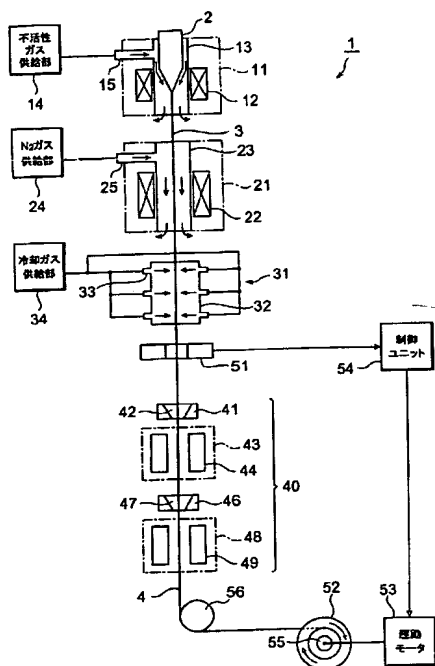
(10) 国際公開番号  
WO 2004/007383 A1

- (51) 国際特許分類: C03B 37/12, C03C 13/04 (72) 発明者; および  
(21) 国際出願番号: PCT/JP2003/008788 (75) 発明者/出願人 (米国についてののみ): 永山 勝也 (NA-GAYAMA, Katsuya) [JP/JP]; 〒233-0015 神奈川県 横浜市 港南区日限山1-67-11-525 Kanagawa (JP). 森田 圭省 (MORITA, Keisei) [JP/JP]; 〒244-8588 神奈川県 横浜市 栄区田谷町1番地 住友電気工業株式会社横浜製作所内 Kanagawa (JP).  
(22) 国際出願日: 2003 年 7 月 10 日 (10.07.2003)  
(25) 国際出願の言語: 日本語  
(26) 国際公開の言語: 日本語 (74) 代理人: 長谷川 芳樹, 外(HASEGAWA, Yoshiki et al.); 〒104-0061 東京都 中央区 銀座一丁目10番6号 銀座ファーストビル 創英国際特許法律事務所 Tokyo (JP).  
(30) 優先権データ: 特願2002-201795 2002 年 7 月 10 日 (10.07.2002) JP (81) 指定国 (国内): CN, IN, JP, KR, US.  
(71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 住友電気工業株式会社 (SUMITOMO ELECTRIC INDUSTRIES, LTD.) [JP/JP]; 〒541-0041 大阪府 大阪市 中央区北浜四丁目5番33号 Osaka (JP). (84) 指定国 (広域): ヨーロッパ特許 (DE, FR, IT).  
添付公開書類:  
— 国際調査報告書

[続葉有]

(54) Title: OPTICAL FIBER AND A METHOD FOR MANUFACTURING SAME

(54) 発明の名称: 光ファイバ及びその製造方法



14...INERT GAS SUPPLYING PART  
24...N<sub>2</sub> GAS SUPPLYING PART  
34...COOLANT GAS SUPPLYING PART  
54...CONTROL UNIT  
55...DRIVING MOTOR

(57) Abstract: An optical fiber matrix (2) is prepared by adding Ge into a core region in an amount which satisfies the condition of  $[Ge] \geq 0.3\%$ , wherein  $[Ge]$  is the relative refractive index difference expressed in a percentage % relative to pure SiO<sub>2</sub>, and formed into an optical fiber (3) by conducting hot wire drawing in a wire drawing furnace (11). In a heat treatment furnace (21) at the succeeding stage of the wire drawing furnace (11), the optical fiber (3) is annealed at a cooling rate of 2000 °C/second or less under the condition that the annealing time is not shorter than the relaxation time. Then the annealed optical fiber (3) is introduced into a cooling means (31) at an introduction temperature not less than 700 °C, and forcedly cooled by the cooling means (31). Consequently, there can be obtained an optical fiber having a reduced Rayleigh scattering loss and a good hydrogen resistant property with a high productivity. A method for manufacturing such an optical fiber is also disclosed.

(57) 要約: コア領域に純SiO<sub>2</sub>に対する%で表した比屈折率差  $[Ge]$  が条件  $[Ge] \geq 0.3\%$  を満たす添加量でGeが添加された光ファイバ母材2を準備し、線引炉11で加熱線引して光ファイバ3とした後、線引炉11の後段の熱処理炉21において、冷却速度が2000°C/秒以下、アニール時間が緩和時間以上となる条件で光ファイバ3をアニールする。さらに、アニールされた光ファイバ3を、冷却手段31へと700°C以上の入線温度で入線し、冷却手段31によって光ファイバ3を強制冷却する。これにより、レイリー散乱損失が低減され、かつ、良好な耐水素特性を有する光ファイバを生産性良く製造することが可能な光ファイバ、及びその製造方法が実現される。

WO 2004/007383 A1

WO 2004/007383 A1



2文字コード及び他の略語については、定期発行される  
各PCTガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語  
のガイダンスノート」を参照。

## 明細書

光ファイバ及びその製造方法

技術分野

5 【0001】 本発明は、低伝送損失で光を伝送する光ファイバ、及びその製造方法に関するものである。

背景技術

10 【0002】 光ファイバを用いた光の伝送において、光ファイバ内でのレイリー散乱によって生じるレイリー散乱損失や、光ファイバ内の構造の乱れによって生じる構造不整損失などの伝送損失が問題となる。これに対して、伝送損失を低減することが可能な光ファイバ、あるいはその製造方法が提案されている。

15 【0003】 例えば、文献「坂口、電子情報通信学会論文誌 2000/1 Vol.J83-C No.1, pp.30-36」に、線引後の光ファイバの徐冷によって、光ファイバでのレイリー散乱損失を低減することが記載されている。すなわち、ガラス内でのレイリー散乱強度は材料によって一定に定まるものではなく、ガラス内での原子の配列状態の乱雑さを示す仮想的な温度である仮想温度 $T_f$  (Fictive Temperature) に依存する。具体的には、ガラス内の仮想温度 $T_f$ が高く（乱雑さが大きく）なると、レイリー散乱強度は増大する。

20 【0004】 これに対して、光ファイバ母材を加熱線引するときに、線引炉の後段に熱処理炉を設置しておき、線引後の光ファイバが熱処理炉を通過するときに所定の温度範囲内となるように加熱して、光ファイバをアニールする。このような光ファイバのアニールによって、線引後における光ファイバの急激な冷却が防止され、光ファイバが徐冷される。このとき、原子の再配列によるガラスの構造緩和によって、光ファイバ内の仮想温度 $T_f$ が低下して、光ファイバ内でのレイリー散乱強度が抑制される。

25 【0005】 上述したように、線引炉の後段に設けられた熱処理炉を用いて光ファイバをアニールすることにより、光ファイバでのレイリー散乱損失を低減す

ることができる。一方、このレイリー散乱損失とは別に、コアにGe（ゲルマニウム）が添加された光ファイバにおいて、Geに起因する欠陥によって波長0.63  $\mu\text{m}$ での幅の広い損失ピークが増大することが知られている。

- 5 【0006】 このような波長0.63  $\mu\text{m}$ での損失は、Si-O欠陥、あるいは非架橋酸素ホールセンター（NBOHC）などの光ファイバ内での欠陥に起因して発生する（例えば、文献「花房、セラミックス 21 (1986) No.9, pp.860-868」参照）。そして、これらの光ファイバ内での欠陥は、水素雰囲気中でSi-O-Hとなるため、OH基に起因する波長1.38  $\mu\text{m}$ での損失ピークが増大する原因となる。また、特開昭60-186430号公報には、線引後の光ファイバ
- 10 を600℃以上でアニールすることにより、上記した波長0.63  $\mu\text{m}$ での損失が低減されることが記載されている。

#### 発明の開示

- 15 【0007】 レイリー散乱損失を低減するとともに、良好な耐水素特性を有する光ファイバを製造するには、線引後の光ファイバに対して、仮想温度 $T_f$ を下させてレイリー散乱損失を低減するための高温でのアニールと、光ファイバ内での欠陥を減少させて波長0.63  $\mu\text{m}$ での損失を低減するための中温でのアニールとを行う必要がある。ここで、良好な耐水素特性を有する、ということは、水素雰囲気下でもOH基に起因する波長1.38  $\mu\text{m}$ での損失ピークが増大しないことをいう。

- 20 【0008】 しかしながら、このように広い温度範囲で光ファイバに対するアニールを行う場合、相当な長さのアニール用の熱処理炉が必要となり、線引炉及び熱処理炉を含む線引装置が大型化するという問題がある。また、線引時における光ファイバの線速をアニールのために低く設定しなくてはならず、光ファイバの生産性が低下する。

- 25 【0009】 本発明は、以上の問題点を解決するためになされたものであり、レイリー散乱損失が低減され、かつ、良好な耐水素特性を有する光ファイバ、及

び生産性の良い光ファイバの製造方法を提供することを目的とする。

【0010】 このような目的を達成するために、本発明による光ファイバの製造方法は、(1) コア領域、及びコア領域の外周に設けられたクラッド領域を有する光ファイバ母材を線引炉によって加熱線引して光ファイバとする線引ステップと、(2) 線引炉で線引された光ファイバを、線引炉の後段に設けられた熱処理炉によってアニールする熱処理ステップと、(3) 熱処理炉でアニールされた光ファイバを、熱処理炉の後段に設けられた冷却手段へと700℃以上の温度で入線し、冷却手段によって強制冷却する冷却ステップとを備え、(4) 熱処理ステップにおいて、光ファイバの冷却速度が2000℃/秒以下となる条件、及び、熱処理炉の長さをL (m)、光ファイバの線速をVf (m/秒)、熱処理炉の入口における光ファイバの粘度を $\eta_s$  (Pa・秒)、単位断面積当たりの光ファイバの張力(張力/光ファイバ断面積、せん断応力)をK (Pa) とし、緩和時間を $\tau = \eta_s / K$  と定義したときに、アニール時間 $L / Vf$ が緩和時間 $\tau$ 以上( $L / Vf \geq \tau$ )となる条件を満たすアニール条件で光ファイバをアニールすることを特徴とする。

【0011】 上記した光ファイバの製造方法においては、光ファイバ母材を加熱線引するときに、線引炉の後段に熱処理炉を設置する。そして、線引後の光ファイバが熱処理炉を通過するときに、光ファイバの冷却速度及びアニール時間が所定の条件を満たすように光ファイバをアニールしている。このように、熱処理炉を用いて光ファイバの徐冷を行うことにより、光ファイバ内の仮想温度 $T_f$ を低下させて、光ファイバでのレイリー散乱損失を低減することができる。

【0012】 また、アニールされた光ファイバに対して、熱処理炉の後段にさらに冷却手段を設置し、この冷却手段によって光ファイバを強制冷却している。これにより、線引装置の長さが短縮されるなど、線引装置を全体として小型化することができる。また、線引時における光ファイバの線速を高くするなど、光ファイバを効率的に製造することが可能となる。

【0013】 また、この冷却手段による光ファイバの強制冷却について、冷却手段への光ファイバの入線温度を700℃以上の温度としている。これにより、波長0.63μmでの損失の増大、及び耐水素特性の劣化による波長1.38μmでの損失の増大の原因となる光ファイバ内でのSi-O欠陥やNBOHCなどの欠陥を減少させることができる。以上より、レイリー散乱損失が低減され、かつ、良好な耐水素特性を有する光ファイバを生産性良く製造することが可能となる。

【0014】 ここで、熱処理ステップにおいては、熱処理炉の炉温を800℃以上1600℃以下の範囲内の所定温度として光ファイバをアニールすることが好ましい。さらに、熱処理炉の炉温を1100℃以上1600℃以下の範囲内の所定温度として光ファイバをアニールすることがより好ましい。これにより、光ファイバでのレイリー散乱損失を十分に低減することができる。

【0015】 本発明による光ファイバは、(1)コア領域と、コア領域の外周に設けられたクラッド領域とを備え、コア領域は、純SiO<sub>2</sub>に対する%で表した比屈折率差[Ge]が条件[Ge]≥0.3%を満たす添加量でGeが添加されているとともに、(2)レイリー散乱係数A (dB/km・μm<sup>4</sup>)、及び波長1.00μmでの伝送損失α<sub>1.00</sub> (dB/km)が、それぞれ次式で表される基準値A<sub>0</sub>、及びα<sub>0</sub>

$$A_0 = 0.85 + 0.29 [Ge]$$

$$\alpha_0 = 0.86 + 0.29 [Ge]$$

に対して97%以下であり、かつ、(3)波長1.38μmでの水素処理前後の伝送損失差Δα<sub>1.38</sub>が0.15dB/km以下であることを特徴とする。

【0016】 上記した光ファイバにおいては、コアに所定の添加量でGeが添加された光ファイバにおいて、そのレイリー散乱係数A、及びレイリー散乱損失を含む伝送損失α<sub>1.00</sub>が、通常の光ファイバでの値を示す基準値A<sub>0</sub>、α<sub>0</sub>よりも3%以上低減されて、97%以下の値となっている。さらに、光ファイバの耐

水素特性に対する指標となる水素処理前後の伝送損失差  $\Delta \alpha_{1.3\mu m}$  が、 $0.15 \text{ dB/km}$  以下に低減されている。これにより、レイリー散乱損失が低減され、かつ、良好な耐水素特性を有する光ファイバが得られる。このような光ファイバは、上述した製造方法によって製造することが可能である。

5     【0017】   ここで、クラッド領域は、それぞれ純  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Ge}$  が添加された  $\text{SiO}_2$ 、または  $\text{F}$  が添加された  $\text{SiO}_2$  のいずれかからなる 1 または複数のクラッド層を有することが好ましい。このような構成によれば、シングルモードファイバ、分散シフトファイバ、及び分散補償ファイバなど、様々な種類の光ファイバが得られる。

10    図面の簡単な説明

      【0018】   図 1 は、光ファイバの製造方法、及び光ファイバの製造に用いられる線引装置の一実施形態を概略的に示す構成図である。

      【0019】   図 2 は、光ファイバの第 1 実施形態での屈折率プロファイルを示すグラフである。

15    【0020】   図 3 は、光ファイバの実施例 A 1 ～ A 4 における製造条件及び損失特性について示す表である。

      【0021】   図 4 は、光ファイバの比較例 B 1 ～ B 5 における製造条件及び損失特性について示す表である。

20    【0022】   図 5 は、光ファイバの第 2 実施形態での屈折率プロファイルを示すグラフである。

      【0023】   図 6 は、光ファイバの第 3 実施形態での屈折率プロファイルを示すグラフである。

      【0024】   図 7 は、光ファイバの実施例 C 1 ～ C 3、及び比較例 D 1 ～ D 3 における製造条件及び損失特性について示す表である。

25    【0025】   図 8 は、光ファイバの実施例 E、及び比較例 F における光ファイバの製造時での温度変化について示す表である。

【0026】 図9は、線速400m/分としたときの光ファイバの冷却速度及びアニール効果について示す表である。

【0027】 図10は、線速800m/分としたときの光ファイバの冷却速度及びアニール効果について示す表である。

5   【0028】 図11は、線速1600m/分としたときの光ファイバの冷却速度及びアニール効果について示す表である。

【0029】 図12は、線速3000m/分としたときの光ファイバの冷却速度及びアニール効果について示す表である。

10   【0030】 図13は、線速800m/分としたときの光ファイバの冷却速度及びアニール効果について示す表である。

発明を実施するための最良の形態

15   【0031】 以下、図面とともに本発明による光ファイバ、及びその製造方法の好適な実施形態について詳細に説明する。なお、図面の説明においては同一要素には同一符号を付し、重複する説明を省略する。また、図面の寸法比率は、説明のものとは必ずしも一致していない。

【0032】 図1は、本発明による光ファイバの製造方法、及び光ファイバの製造に用いられる線引装置の一実施形態を概略的に示す構成図である。

20   【0033】 図1に示す線引装置1は、石英ガラス系の光ファイバを線引するために用いられる線引装置であり、線引炉11、徐冷用の熱処理炉21、及び冷却手段31を有して構成されている。これらの線引炉11、熱処理炉21、及び冷却手段31は、光ファイバ母材2を線引する方向（図1における上下方向）にこの順で設置されている。また、熱処理炉21及び冷却手段31の後段には、線引されたガラスファイバ3を樹脂によって被覆する樹脂被覆部40が設けられている。

25   【0034】 本線引装置1を用いた光ファイバの製造においては、まず、コア領域、及びコア領域の外周に設けられたクラッド領域を有して構成された光フ



イバ母材 2 を準備し、母材供給装置（図示していない）に保持された光ファイバ母材 2 を線引炉 1 1 へと供給する。そして、線引炉 1 1 内のヒータ 1 2 によって光ファイバ母材 2 の下端を加熱して軟化させ、所定の線速で線引してガラスファイバ 3 とする（線引ステップ）。線引炉 1 1 の炉心管 1 3 には、不活性ガス供給部 1 4 からのガス供給通路 1 5 が接続されており、炉心管 1 3 内が不活性ガス雰囲気となるように構成されている。

【0035】 加熱線引されたガラスファイバ 3 は炉心管 1 3 内にて、例えば 1700℃程度にまで不活性ガスにより急激に冷却される。その後、ガラスファイバ 3 は、炉心管 1 3 の下部から線引炉 1 1 外に出され、線引炉 1 1 と熱処理炉 2 1 との間にて空冷される。不活性ガスとしては、例えば  $N_2$  ガスを用いることができる。 $N_2$  ガスの熱伝導係数  $\lambda$  ( $T=300\text{ K}$ ) は  $26\text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$  である。また、空気の熱伝導係数  $\lambda$  ( $T=300\text{ K}$ ) は  $26\text{ mW}/(\text{m} \cdot \text{K})$  である。

【0036】 次に、線引され空冷されたガラスファイバ 3 を、線引炉 1 1 と樹脂被覆部 4 0 との間であって、線引炉 1 1 の後段の所定位置に設けられたアニール用の熱処理炉 2 1 に送る。そして、熱処理炉 2 1 内のヒータ 2 2 によってガラスファイバ 3 を所定温度でアニールする（熱処理ステップ）。この熱処理炉 2 1 では、光ファイバの冷却速度、アニール時間、及びアニール温度などのアニール条件が所定の条件を満たすようにガラスファイバ 3 をアニールする。

【0037】 具体的には、ガラスファイバ 3 の冷却速度については、冷却速度が  $2000^\circ\text{C}/\text{秒}$  以下となる条件を満たすようにガラスファイバ 3 をアニールする。また、ガラスファイバ 3 のアニール時間については、熱処理炉 2 1 の長さを  $L$  (m)、ガラスファイバ 3 の線速を  $V_f$  (m/秒)、熱処理炉 2 1 の入口におけるガラスファイバ 3 の粘度を  $\eta_s$  (Pa・秒)、単位断面積当たりのガラスファイバ 3 の張力（張力/光ファイバ断面積、せん断応力）を  $K$  (Pa) とし、緩和時間を  $\tau = \eta_s / K$  と定義したときに、アニール時間  $L/V_f$  が緩和時間  $\tau$  以上（

$L/Vf \geq \tau$ ) となる条件を満たすようにガラスファイバ3をアニールする。

【0038】 なお、ガラスファイバ3の冷却速度は、熱処理炉21の入口（アニールの開始時）におけるガラスファイバ3の温度を $T_s$ （℃）、熱処理炉21の出口（アニールの終了時）におけるガラスファイバ3の温度を $T_e$ （℃）としたときに、冷却速度＝ $(T_s - T_e) \times Vf / L$ によって定義される。

【0039】 また、熱処理炉21では、上記したガラスファイバ3の冷却速度及びアニール時間についての条件が満たされるように、熱処理炉21の炉温となるヒータ22の温度を設定することが好ましい。具体的には、ヒータ22の温度を800℃以上1600℃以下の範囲内にある所定温度として、ガラスファイバ3のアニールを行うことが好ましい。あるいはさらに、ヒータ22の温度を1100℃以上1600℃以下の範囲内にある所定温度として、ガラスファイバ3のアニールを行うことが好ましい。

【0040】 熱処理炉21は、その中をガラスファイバ3が通過する炉心管23を有する。熱処理炉21の炉心管23には、 $N_2$ ガス供給部24からのガス供給通路25が接続されており、炉心管23内が $N_2$ ガス雰囲気となるように構成されている。 $N_2$ ガスを用いる代わりに、空気あるいはArなどの分子量が比較的大きいガス等を用いることも可能である。ただし、炉心管がカーボン製である場合には、酸素を含まないガスを用いる必要がある。

【0041】 続いて、アニールされたガラスファイバ3を、線引炉11と樹脂被覆部40との間であって、熱処理炉21の後段の所定位置に設けられた強制冷却用の冷却手段31に送る。そして、冷却手段31によってガラスファイバ3を所定温度まで冷却する（冷却ステップ）。この冷却手段31は、熱処理炉21でアニールされたガラスファイバ3が、700℃以上の所定温度、好ましくは700℃以上1300℃以下の範囲内にある所定温度で冷却手段31へと入線されるように配置されている。

【0042】 冷却手段31は、その中をガラスファイバ3が通過する円筒状の

管 3 2 を有する。また、円筒管 3 2 の側壁には、冷却ガス供給部 3 4 に接続された複数のノズル 3 3 が設けられている。これにより、円筒管 3 2 中を通過するガラスファイバ 3 に対して冷却ガス供給部 3 4 からの冷却ガスが供給され、ガラスファイバ 3 が強制的に冷却される。冷却ガスとしては、好ましくは H e ガスが用いられる。

【 0 0 4 3 】 冷却手段 3 1 を出たガラスファイバ 3 は、外径測定器 5 1 により外径がオンライン測定される。そして、その測定値がドラム 5 2 を回転駆動する駆動モータ 5 3 にフィードバックされて、外径が一定となるようにドラム 5 2 の回転が駆動制御される。外径測定器 5 1 からの出力信号は、制御手段としての制御ユニット 5 4 に送られる。制御ユニット 5 4 は、ガラスファイバ 3 の外径があらかじめ設定された所定値となるように、ドラム 5 2 及び駆動モータ 5 3 の回転速度を演算によって求める。

【 0 0 4 4 】 制御ユニット 5 4 からは、演算によって求めたドラム 5 2 及び駆動モータ 5 3 の回転速度を示す出力信号が、駆動モータ用ドライバ（図示していない）に出力される。この駆動モータ用ドライバは、制御ユニット 5 4 からの出力信号に基づいて、駆動モータ 5 3 の回転速度を制御する。

【 0 0 4 5 】 外径測定器 5 1 によって外径が測定されたガラスファイバ 3 は、2 段（タンデム）に構成された樹脂被覆部 4 0 へと入線される。まず、1 段目の樹脂被覆部において、外径測定器 5 1 を通過したガラスファイバ 3 に対し、コーティングダイス 4 1 により U V 樹脂 4 2 が塗布される。塗布された U V 樹脂 4 2 は、樹脂硬化部 4 3 の U V ランプ 4 4 からの紫外光によって硬化される。

【 0 0 4 6 】 さらに、2 段目の樹脂被覆部において、樹脂硬化部 4 3 からのガラスファイバ 3 に対し、コーティングダイス 4 6 により U V 樹脂 4 7 が塗布される。塗布された U V 樹脂 4 7 は、樹脂硬化部 4 8 の U V ランプ 4 9 からの紫外光によって硬化される。これにより、ガラスファイバ 3 が樹脂によって被覆された光ファイバ素線 4 が形成される。そして、光ファイバ素線 4 は、ガイドローラ 5

6を経て、ドラム52によって巻き取られる。ドラム52は、回転駆動軸55に支持されており、この回転駆動軸55の端部は駆動モータ53に接続されている。

【0047】 なお、線引炉11の炉心管13には、上述したように不活性ガス供給部14からのガス供給通路15が接続されており、炉心管13内が不活性ガス雰囲気となるように構成されている。これに対して、不活性ガス供給部14として $N_2$ ガス供給部を設け、炉心管13内に $N_2$ ガスを供給して $N_2$ ガス雰囲気となるように構成しても良い。また、Heガス供給部と $N_2$ ガス供給部とを併設し、線速に応じて炉心管13内にHeガスまたは $N_2$ ガスを供給する構成としても良い。

【0048】 上述した実施形態の光ファイバの製造方法による効果について説明する。

【0049】 図1に示した光ファイバの製造方法では、光ファイバ母材2を加熱線引するときに、線引炉11の後段に熱処理炉21を設置する。そして、線引後のガラスファイバ3が熱処理炉21を通過するときに、ガラスファイバ3の冷却速度及びアニール時間が所定の条件を満たすようにガラスファイバ3をアニールしている。このように、熱処理炉21を用いて光ファイバの徐冷を行うことにより、光ファイバ内の仮想温度 $T_f$ を低下させて、光ファイバでのレイリー散乱損失を低減することができる。

【0050】 また、熱処理炉21でアニールされたガラスファイバ3に対して、熱処理炉21の後段にさらに冷却手段31を設置し、この冷却手段31によってガラスファイバ3を強制冷却している。これにより、熱処理炉21を出たガラスファイバを数10℃まで冷却するのに必要なパスライン長が短縮される。こうして、線引炉11及び熱処理炉21を含む線引装置1の長さ（線引装置の高さ）が短縮されるので、図1に示した構成の線引装置1を全体として小型化することができる。

【0051】 例えば、線引炉11及び熱処理炉21の後段に樹脂被覆部40が設置されている構成では、ガラスファイバ3を樹脂によって被覆するときに、ガラスファイバ3が十分に冷却されている必要がある。これに対して、図1に示した線引装置1では、冷却手段31でガラスファイバ3を適当な温度まで冷却することができる。また、線引時におけるガラスファイバ3の線速（線引速度）を高くするなど、ガラスファイバ3及び光ファイバ素線4を効率的に製造することが可能となる。

【0052】 また、この冷却手段31によるガラスファイバ3の強制冷却について、冷却手段31へのガラスファイバ3の入線温度を700℃以上の温度としている。これにより、波長0.63μmでの損失の増大、及び耐水素特性の劣化による波長1.38μmでの損失の増大の原因となる光ファイバ内でのSi-O欠陥やNBOHCなどの欠陥を減少させることができる。以上より、レイリー散乱損失が低減され、かつ、良好な耐水素特性を有するガラスファイバ3を生産性良く製造することが可能となる。

【0053】 ここで、ガラスファイバ3のアニールにおいては、熱処理炉21の炉温を800℃以上1600℃以下の範囲内の所定温度としてガラスファイバ3をアニールすることが好ましい。さらに、熱処理炉21の炉温を1100℃以上1600℃以下の範囲内の所定温度としてガラスファイバ3をアニールすることがより好ましい。これにより、ガラスファイバ3でのレイリー散乱損失を十分に低減することができる。

【0054】 また、アニール開始時のガラスファイバ3の温度 $T_s$ については、いったん温度が下がってからアニールすると、アニールの効果を出すために要する時間が長くなることから、1400℃以上1600℃以下の温度とすることが好ましい。このガラスファイバ3の熱処理炉21への入線温度は、ガラスファイバの具体的な構成に応じて設定すると良い。

【0055】 一方、冷却手段31へのガラスファイバ3の入線温度は、700

℃以上1300℃以下の範囲内での所定温度とすることが好ましい。これにより、ガラスファイバ3内での欠陥の確実な減少と、ガラスファイバ3の効率的な強制冷却とを、好適に両立することができる。

5 【0056】 また、線引炉11による線引、熱処理炉21によるアニール、及び冷却手段31による強制冷却においては、ガラスファイバ3の線速を300m/分以上とすることが好ましい。このように、線引時でのガラスファイバ3の線速を比較的高い線速とすることにより、ガラスファイバ3の生産性を向上することができる。

10 【0057】 また、熱処理炉21によるガラスファイバ3のアニールについては、0.03秒以上0.8秒以下のアニール時間でアニールを行うことが好ましい。このような範囲内での所定時間でガラスファイバ3のアニールを行うことにより、ガラスファイバ3でのレイリー散乱損失を十分に低減することができる。

15 【0058】 次に、本発明による光ファイバについて説明する。なお、以下に示す光ファイバは、上述した製造方法によって好適に製造することが可能である。

【0059】 図2は、本発明による光ファイバの第1実施形態について、その屈折率プロファイルを示すグラフである。このグラフにおいて、横軸は光ファイバ内の各部位の中心軸からみた位置を示している。また、縦軸は光ファイバ内の各部位での純SiO<sub>2</sub>に対する比屈折率差(%)を示している。

20 【0060】 本実施形態の光ファイバは、コア領域100と、コア領域100の外周に設けられたクラッド領域110とを備える。コア領域100は、光ファイバの中心軸を含んだ半径r<sub>0</sub>の層として形成されている。また、このコア領域100は、所定の添加量でGeが添加されたSiO<sub>2</sub>からなる。

25 【0061】 具体的には、コア領域100には、純SiO<sub>2</sub>に対する%で表した比屈折率差[Ge]によってGeの添加量を表したときに、条件

$$[Ge] \geq 0.3\%$$

を満たす添加量でGeが添加されている。これにより、コア領域100の比屈折率差 $\Delta n_0$ は、 $\Delta n_0 = [Ge] > 0$ となっている。

5 【0062】 また、クラッド領域110は、本実施形態では、1層のクラッド層111から構成されている。クラッド層111は、コア領域100の外周に設けられた半径 $r_1$ の層として形成されている。また、このクラッド層111は、純SiO<sub>2</sub>からなる。これにより、クラッド層111の比屈折率差 $\Delta n_1$ は、 $\Delta n_1 = 0$ となっている。

10 【0063】 このような構成において、本光ファイバは、光ファイバで発生するレイリー散乱損失についてのレイリー散乱係数 $A$  (dB/km $\cdot\mu m^4$ )、及び波長 $1.00\mu m$ での伝送損失 $\alpha_{1.00}$  (dB/km)が、それぞれ次式で表される基準値 $A_0$ 、及び $\alpha_0$

$$A_0 = 0.85 + 0.29 [Ge]$$

$$\alpha_0 = 0.86 + 0.29 [Ge]$$

15 に対して97%以下となるように形成されている。さらに、本光ファイバは、波長 $1.38\mu m$ での水素処理前後の伝送損失差 $\Delta\alpha_{1.38}$ が $0.15\text{ dB/km}$ 以下となるように形成されている。ここで、 $A_0$ は、例えば $[Ge] = 0.35\%$ であれば、 $A_0 = 0.85 + 0.29 \times 0.35 = 0.95$ である。

20 【0064】 図2に示した光ファイバでは、そのコア領域100に対して、条件 $[Ge] \geq 0.3\%$ を満たす添加量でGeが添加されている。このようにコアにGeが添加された光ファイバでは、Geに起因して光ファイバ内でのSi-O欠陥やNBOHCなどの欠陥が発生しやすい。そして、これらの欠陥は、上述したように、波長 $0.63\mu m$ での損失の増大、及び耐水素特性の劣化による波長 $1.38\mu m$ での損失の増大の原因となる。

25 【0065】 これに対して、上記した光ファイバでは、コア領域100にGeが添加された光ファイバにおいて、そのレイリー散乱係数 $A$ 、及びレイリー散乱損失を含む伝送損失 $\alpha_{1.00}$ が、通常の光ファイバでの値を示す基準値 $A_0$ 、 $\alpha_0$

よりも3%以上低減されて、97%以下の値となっている。さらに、後述するように光ファイバ内に発生している欠陥の量に依存し、光ファイバの耐水素特性に対する指標となる水素処理前後の伝送損失差 $\Delta \alpha_{1.38}$ が、0.15 dB/km以下に低減されている。これにより、レイリー散乱損失が低減され、かつ、良好な耐水素特性を有する光ファイバが得られる。

5

【0066】 ここで、コア領域100の外周に設けられるクラッド領域110については、図2に示した構成では純SiO<sub>2</sub>からなる1層のクラッド層111を有する構成としたが、一般には、それぞれ純SiO<sub>2</sub>、Geが添加されたSiO<sub>2</sub>、またはFが添加されたSiO<sub>2</sub>のいずれかからなる1層または複数層のクラッド層を有する構成とすることが好ましい。

10

【0067】 このような構成によれば、シングルモードファイバ（SMF：Single Mode Fiber）、分散シフトファイバ（DSF：Dispersion Shift Fiber）、及び分散補償ファイバ（DCF：Dispersion Compensation Fiber）など、様々な種類の光ファイバを、良好な特性によって生産性良く製造することができる。

15

【0068】 上述した光ファイバの各特性条件について、さらに説明する。本実施形態の光ファイバでは、レイリー散乱損失等の低減効果を評価するための指標として、レイリー散乱係数A、及び波長1.00  $\mu$ mでの伝送損失 $\alpha_{1.00}$ を用い、これらのレイリー散乱係数A、及び伝送損失 $\alpha_{1.00}$ を、通常値を示す基準値A<sub>0</sub>、 $\alpha_0$ よりも3%以上低減された、97%以下の値としている。

20

【0069】 光ファイバでの波長 $\lambda$ における伝送損失 $\alpha_\lambda$ （dB/km）は、レイリー散乱損失と、それ以外の構造不整損失などの伝送損失成分により、一般に次式

$$\alpha_\lambda = A/\lambda^4 + B + C(\lambda)$$

で表される。このうち、第1項 $A/\lambda^4$ （dB/km）がレイリー散乱損失を示しており、その係数Aがレイリー散乱係数（dB/km $\cdot\mu$ m<sup>4</sup>）である。上式より、レイリー散乱損失はレイリー散乱係数Aに比例しており、したがって、レ

25



レイリー散乱係数Aが基準値から3%低減されれば、レイリー散乱損失が3%低減されることとなる。

【0070】 ここで、熱処理炉による光ファイバのアニール等を行わない通常の製造方法によって得られる光ファイバでは、コア領域へのGeの添加量を上述した[Ge]で表したとき、レイリー散乱係数A (dB/km・ $\mu\text{m}^4$ ) の値は、次式

$$A_0 = 0.85 + 0.29 [\text{Ge}]$$

となる。したがって、この通常での値 $A_0$ をレイリー散乱係数Aの基準値とすることができる。このとき、得られた光ファイバでのレイリー散乱係数Aが、基準値 $A_0$ から3%以上低減されていれば良い。

【0071】 また、レイリー散乱損失を含む全体の伝送損失を評価するため、波長 $1.00\mu\text{m}$ での伝送損失 $\alpha_{1.00}$ を指標としても良い。波長 $1.00\mu\text{m}$ では、上記した伝送損失 $\alpha_\lambda$ の表式中、 $B+C(\lambda)$ はほぼ0.01であり、したがって、通常の製造方法で得られる光ファイバでは、伝送損失 $\alpha_{1.00}$  (dB/km) の値は、次式

$$\begin{aligned}\alpha_0 &= A_0 + 0.01 \\ &= 0.86 + 0.29 [\text{Ge}]\end{aligned}$$

となる。したがって、この通常での値 $\alpha_0$ を伝送損失 $\alpha_{1.00}$ の基準値とすることができる。このとき、得られた光ファイバでの伝送損失 $\alpha_{1.00}$ が、基準値 $\alpha_0$ から3%以上低減されることが好ましい。

【0072】 このように、レイリー散乱係数A、または伝送損失 $\alpha_{1.00}$ を指標として用いることによって、レイリー散乱損失、あるいはレイリー散乱損失を含む全体の伝送損失の低減効果を確実に得ることが可能となる。また、上記した基準値 $A_0$ 、 $\alpha_0$ のそれぞれの表式によれば、表式中に、コアへのGeの添加量に関する変数[Ge]が含まれている。したがって、Geの添加量に応じた伝送損失の評価が可能である。

【0073】 なお、レイリー散乱係数 $A$ については、上式より、伝送損失の波長依存性のデータ（例えば $1/\lambda^4$ プロットでの傾き）から求めることができる。また、全体の伝送損失を評価する指標として、波長 $1.00\mu\text{m}$ での伝送損失 $\alpha_{1.00}$ を用いているが、これは、 $1.00\mu\text{m}$ での伝送損失の値が、光伝送に用いられる $1.55\mu\text{m}$ の波長帯域などに比べて大きく、 $1\sim 10\text{km}$ 程度の比較的短い光ファイバサンプルで、十分な精度で評価できるためである。

【0074】 また、光ファイバの波長 $1.00\mu\text{m}$ での伝送損失 $\alpha_{1.00}$ と、波長 $1.55\mu\text{m}$ での伝送損失 $\alpha_{1.55}$ とは一定の関係を有して対応しており、伝送損失 $\alpha_{1.00}$ で低減効果を評価することによって、伝送損失 $\alpha_{1.55}$ についても、同様にその低減を確認することができる。具体的な対応関係としては、波長 $1.00\mu\text{m}$ での伝送損失 $\alpha_{1.00}$ は、上記したように

$$\alpha_{1.00} = A + 0.01$$

で表されるが、この表式に相当する波長 $1.55\mu\text{m}$ での伝送損失 $\alpha_{1.55}$ の表式は、次式

$$\alpha_{1.55} = A \times 0.17325 + 0.025$$

である。

【0075】 次に、上述した光ファイバでの伝送損失差 $\Delta\alpha_{1.38}$ に対する特性条件について説明する。本実施形態の光ファイバでは、光ファイバの耐水素特性に対する指標として、波長 $1.38\mu\text{m}$ での水素処理前後の伝送損失差 $\Delta\alpha_{1.38}$ を用い、この伝送損失差 $\Delta\alpha_{1.38}$ を、 $0.15\text{dB/km}$ 以下の値としている。

【0076】 コア領域に $\text{Ge}$ が添加された構成の光ファイバでは、上述したように、 $\text{Ge}$ に起因する $\text{Si-O}$ 欠陥、 $\text{NBOHC}$ などの欠陥によって、波長 $0.63\mu\text{m}$ での幅の広い損失ピークが増大する。これらの欠陥は、水素雰囲気中で $\text{Si-O-H}$ となり、 $\text{OH}$ 基による波長 $1.38\mu\text{m}$ での損失の増大の原因となる。

【0077】 したがって、この波長 $1.38\mu\text{m}$ での伝送損失 $\alpha_{1.38}$ について、水素処理前と水素処理後との伝送損失差 $\Delta\alpha_{1.38}$ を求めることにより、線引後の光ファイバに発生している欠陥について評価することができる。そして、この伝送損失差 $\Delta\alpha_{1.38}$ を $0.15\text{dB/km}$ 以下とすることにより、良好な耐水素特性を有する光ファイバを得ることができる。

【0078】 ここで、水素処理前後の伝送損失差 $\Delta\alpha_{1.38}$ については、具体的には、窒素99%：水素1%の水素雰囲気中において、温度 $80^{\circ}\text{C}$ で20時間の水素処理を行う。そして、水素処理前の光ファイバに対して得られた波長 $1.38\mu\text{m}$ での伝送損失 $\alpha_{1.38}$ と、水素処理後の光ファイバに対して得られた伝送損失 $\alpha_{1.38}$ との差である損失の増大分から、耐水素特性の指標となる伝送損失差 $\Delta\alpha_{1.38}$ を求めている。水素処理前の光ファイバでの欠陥の発生が抑制されれば、伝送損失差 $\Delta\alpha_{1.38}$ は低減される。

【0079】 本発明による光ファイバ、及びその製造方法による伝送損失の低減効果、及び耐水素特性の向上効果について、具体的な実施例及び比較例とともに説明する。なお、以下に示す実施例での光ファイバでは、いずれも図1に示した構成の線引装置1を用いて製造することとしている。

【0080】 図3は、本発明による光ファイバの実施例A1～A4における製造条件、及びその損失特性について示す表である。ここでは、製造される光ファイバとして、図2に示した構成を有するGe添加シングルモードファイバ（Ge-SM）を想定している。具体的には、Geが添加された $\text{SiO}_2$ からなるコア領域100の外径を $2r_0=8\mu\text{m}$ 、比屈折率差を $\Delta n_0=[\text{Ge}]=0.35\%$ 、純 $\text{SiO}_2$ からなるクラッド層111の外径を $2r_1=125\mu\text{m}$ 、比屈折率差を $\Delta n_1=0\%$ に設定している。

【0081】 また、その製造条件については、光ファイバ3を強制冷却する冷却手段31としては、直径 $6\text{mm}$ 、長さ $4\text{m}$ のものをを用い、また、冷却ガスとしてHeガスを $20\text{l/分}$ （ $20\text{s}^{-1}\text{m}$ ）の流量で供給している。また、光ファイ

バ3を線引する線速を400m/分としている。また、熱処理炉21における光ファイバ3のアニール温度(℃)、及び冷却手段31への光ファイバ3の入線温度(℃)は、各実施例について図3の表中に示す通りである。なお、光ファイバのアニール条件については、上述した冷却速度を2000℃/秒以下とする条件、  
5 及びアニール時間 $L/V_f$ を緩和時間 $\tau$ 以上とする条件を満たすように設定している。

【0082】 また、図3の表には、各実施例での光ファイバの損失特性として、波長 $1.55\mu\text{m}$ での伝送損失 $\alpha_{1.55}$ (dB/km)、及び波長 $0.63\mu\text{m}$ での伝送損失 $\alpha_{0.63}$ (dB/km)を示している。これらの損失値は、いずれも  
10 光ファイバに対して水素処理を行う前のものである。

【0083】 これらの損失値のうち、波長 $1.55\mu\text{m}$ での伝送損失 $\alpha_{1.55}$ は、熱処理炉21で線引後の光ファイバ3をアニールすることによるレイリー散乱損失の低減効果を主に示している。また、波長 $0.63\mu\text{m}$ での伝送損失 $\alpha_{0.63}$ は、アニール後の光ファイバ3の冷却手段31での強制冷却等による光ファイ  
15 バ内での欠陥の低減効果を示している。

【0084】 この伝送損失 $\alpha_{0.63}$ が増大する原因となる光ファイバ内での欠陥は、上述したように、光ファイバに対して水素処理を行った後において、波長 $1.38\mu\text{m}$ での損失の増大の原因となるものである。

【0085】 図3の表に示した実施例A1～A4のうち、実施例A1では、熱  
20 処理炉でのアニール温度を1100℃、冷却手段への入線温度を700℃に設定しており、得られた伝送損失は $\alpha_{1.55}=0.185\text{ dB/km}$ 、 $\alpha_{0.63}=6\text{ dB/km}$ となっている。また、実施例A2では、熱処理炉でのアニール温度を1400℃、冷却手段への入線温度を1000℃に設定しており、得られた伝送損失は $\alpha_{1.55}=0.180\text{ dB/km}$ 、 $\alpha_{0.63}=6\text{ dB/km}$ となっている。

25 【0086】 また、実施例A3では、熱処理炉でのアニール温度を1550℃、冷却手段への入線温度を1200℃に設定しており、得られた伝送損失は $\alpha_{1.55}$

$\alpha_{1.55} = 0.182 \text{ dB/km}$ 、 $\alpha_{0.63} = 7 \text{ dB/km}$ となっている。また、実施例 A 4 では、熱処理炉でのアニール温度を  $1550^\circ\text{C}$ 、冷却手段への入線温度を  $1300^\circ\text{C}$  に設定しており、得られた伝送損失は  $\alpha_{1.55} = 0.182 \text{ dB/km}$ 、 $\alpha_{0.63} = 9 \text{ dB/km}$  となっている。

- 5     【0087】 これらの実施例では、熱処理炉でのアニール温度が、いずれも  $1100^\circ\text{C}$  以上  $1600^\circ\text{C}$  以下の範囲内での温度となっている。これにより、光ファイバでのレイリー散乱損失が低減されて、レイリー散乱損失を含む波長  $1.55 \mu\text{m}$  での伝送損失  $\alpha_{1.55}$  が低減されている。また、冷却手段への入線温度が、いずれも  $700^\circ\text{C}$  以上の範囲内での温度となっている。これにより、光ファイバ内での欠陥が減少されて、欠陥に起因する波長  $0.63 \mu\text{m}$  での伝送損失  $\alpha_{0.63}$  が低減されている。

- 10    【0088】 一方、図 4 は、光ファイバの比較例 B 1～B 5 における製造条件、及びその損失特性について示す表である。ここでは、製造される光ファイバとして、図 2 に示した構成を有する実施例 A 1～A 4 と同様の Ge 添加シングルモードファイバ (Ge-SM) を想定している。

- 15    【0089】 図 4 の表に示した比較例 B 1～B 5 のうち、比較例 B 1 では、熱処理炉でのアニールを行わず、冷却手段への入線温度を  $1000^\circ\text{C}$  に設定しており、得られた伝送損失は  $\alpha_{1.55} = 0.190 \text{ dB/km}$ 、 $\alpha_{0.63} = 12 \text{ dB/km}$  となっている。ここでは、光ファイバをアニールしていないために、レイリー散乱損失を含む伝送損失  $\alpha_{1.55}$  が大きくなっている。また、光ファイバ内での欠陥に起因する伝送損失  $\alpha_{0.63}$  も大きくなっている。

- 20    【0090】 また、比較例 B 2 では、熱処理炉でのアニールを行わず、冷却手段への入線温度を  $500^\circ\text{C}$  に設定しており、得られた伝送損失は  $\alpha_{1.55} = 0.190 \text{ dB/km}$ 、 $\alpha_{0.63} = 6 \text{ dB/km}$  となっている。ここでは、光ファイバをアニールしていないために、レイリー散乱損失を含む伝送損失  $\alpha_{1.55}$  が大きくなっている。ただし、冷却手段への入線温度が低いため、伝送損失  $\alpha_{0.63}$  は低くな

っている。

【0091】 また、比較例B3では、熱処理炉でのアニール温度を900℃、冷却手段への入線温度を500℃に設定しており、得られた伝送損失は $\alpha_{1.55} = 0.189 \text{ dB/km}$ 、 $\alpha_{0.63} = 6 \text{ dB/km}$ となっている。ここでは、光ファイバのアニール温度が低いために、レイリー散乱損失を含む伝送損失 $\alpha_{1.55}$ が大きくなっている。ただし、冷却手段への入線温度が低いために、伝送損失 $\alpha_{0.63}$ は低くなっている。

【0092】 また、比較例B4では、熱処理炉でのアニール温度を1100℃、冷却手段への入線温度を500℃に設定しており、得られた伝送損失は $\alpha_{1.55} = 0.185 \text{ dB/km}$ 、 $\alpha_{0.63} = 6 \text{ dB/km}$ となっている。ここでは、光ファイバのアニール温度が比較的高く、レイリー散乱損失を含む伝送損失 $\alpha_{1.55}$ がある程度低減されている。また、冷却手段への入線温度も低く、伝送損失 $\alpha_{0.63}$ も低くなっており、損失特性については、良好な特性の光ファイバが得られている。しかしながら、このように冷却手段への入線温度を500℃と低くする場合、熱処理炉と冷却手段との間で光ファイバを十分に空冷しなくてはならず、線引装置を全体として小型化することができない。

【0093】 また、比較例B5では、熱処理炉でのアニール温度を1650℃、冷却手段への入線温度を1300℃に設定しており、得られた伝送損失は $\alpha_{1.55} = 0.188 \text{ dB/km}$ 、 $\alpha_{0.63} = 10 \text{ dB/km}$ となっている。ここでは、光ファイバのアニール温度が高過ぎるために、レイリー散乱損失を含む伝送損失 $\alpha_{1.55}$ が大きくなっている。また、光ファイバ内での欠陥に起因する伝送損失 $\alpha_{0.63}$ も大きくなっている。

【0094】 以上の実施例A1～A4、及び比較例B1～B5より、熱処理炉による光ファイバのアニール温度を1100℃以上1600℃以下の温度とし、かつ、冷却手段への光ファイバの入線温度を700℃以上の温度、好ましくは、700℃以上1300℃以下の温度とすることにより、レイリー散乱損失が低減

され、かつ、良好な耐水素特性を有する光ファイバが得られる。さらに、線引装置を小型化して、生産性良く光ファイバを製造することが可能となる。

【0095】 本発明による光ファイバについてさらに説明する。

5      【0096】 図5は、光ファイバの第2実施形態について、その屈折率プロファイルを示すグラフである。このグラフにおいて、横軸は光ファイバ内の各部位の中心軸からみた位置を示している。また、縦軸は光ファイバ内の各部位での純SiO<sub>2</sub>に対する比屈折率差(%)を示している。

10      【0097】 本実施形態の光ファイバは、コア領域200と、コア領域200の外周に設けられたクラッド領域210とを備える。コア領域200は、光ファイバの中心軸を含んだ半径r<sub>0</sub>の層として形成されている。また、このコア領域200は、上述した条件

$$[Ge] \geq 0.3\%$$

を満たす添加量でGeが添加されたSiO<sub>2</sub>からなる。これにより、コア領域200の比屈折率差 $\Delta n_0$ は、 $\Delta n_0 = [Ge] > 0$ となっている。

15      【0098】 また、クラッド領域210は、本実施形態では、2層のクラッド層211、212から構成されている。内側の第1クラッド層211は、コア領域200の外周に設けられた半径r<sub>1</sub>の層として形成されている。また、このクラッド層211は、Geが所定の添加量で添加されたSiO<sub>2</sub>からなる。これにより、クラッド層211の比屈折率差 $\Delta n_1$ は、 $\Delta n_1 > 0$ となっている。

20      【0099】 また、外側の第2クラッド層212は、第1クラッド層211の外周に設けられた半径r<sub>2</sub>の層として形成されている。また、このクラッド層212は、純SiO<sub>2</sub>からなる。これにより、クラッド層212の比屈折率差 $\Delta n_2$ は、 $\Delta n_2 = 0$ となっている。

25      【0100】 なお、レイリー散乱係数A、波長1.00 $\mu$ mでの伝送損失 $\alpha_{1.00}$ 、及び波長1.38 $\mu$ mでの水素処理前後の伝送損失差 $\Delta \alpha_{1.38}$ については、図2に示した第1実施形態の光ファイバについて上述した特性条件と同様であ

る。また、このような構成の光ファイバは、例えば分散シフトファイバ（DSF）に好適に適用することが可能である。

【0101】 図6は、光ファイバの第3実施形態について、その屈折率プロファイルを示すグラフである。このグラフにおいて、横軸は光ファイバ内の各部位の中心軸からみた位置を示している。また、縦軸は光ファイバ内の各部位での純SiO<sub>2</sub>に対する比屈折率差（%）を示している。

【0102】 本実施形態の光ファイバは、コア領域300と、コア領域300の外周に設けられたクラッド領域310とを備える。コア領域300は、光ファイバの中心軸を含んだ半径r<sub>0</sub>の層として形成されている。また、このコア領域300は、上述した条件

$$[Ge] \geq 0.3\%$$

を満たす添加量でGeが添加されたSiO<sub>2</sub>からなる。これにより、コア領域300の比屈折率差 $\Delta n_0$ は、 $\Delta n_0 = [Ge] > 0$ となっている。

【0103】 また、クラッド領域310は、本実施形態では、2層のクラッド層311、312から構成されている。内側の第1クラッド層311は、コア領域300の外周に設けられた半径r<sub>1</sub>の層として形成されている。また、このクラッド層311は、Fが所定の添加量で添加されたSiO<sub>2</sub>からなる。これにより、クラッド層311の比屈折率差 $\Delta n_1$ は、 $\Delta n_1 < 0$ となっている。

【0104】 また、外側の第2クラッド層312は、第1クラッド層311の外周に設けられた半径r<sub>2</sub>の層として形成されている。また、このクラッド層312は、純SiO<sub>2</sub>からなる。これにより、クラッド層312の比屈折率差 $\Delta n_2$ は、 $\Delta n_2 = 0$ となっている。

【0105】 なお、レイリー散乱係数A、波長1.00μmでの伝送損失 $\alpha_{1.00}$ 、及び波長1.38μmでの水素処理前後の伝送損失差 $\Delta\alpha_{1.38}$ については、図2に示した第1実施形態の光ファイバについて上述した特性条件と同様である。また、このような構成を有する光ファイバは、例えば分散補償ファイバ（D



C F) に好適に適用することが可能である。

【0106】 図2、図5、及び図6に示した各実施形態の光ファイバにおける伝送損失の低減効果、及び耐水素特性の向上効果について、具体的な実施例及び比較例とともに説明する。

5      【0107】 図7は、光ファイバの実施例C1～C3、及び比較例D1～D3における製造条件、及びその損失特性について示す表である。

10      【0108】 ここで、実施例C1及び比較例D1では、製造される光ファイバとして、図2に示した構成を有するGe添加シングルモードファイバ (Ge-SM) を想定している。具体的には、Geが添加されたSiO<sub>2</sub>からなるコア領域100の外径を $2r_0=8\mu\text{m}$ 、比屈折率差を $\Delta n_0=[\text{Ge}]=0.35\%$ 、純SiO<sub>2</sub>からなるクラッド層111の外径を $2r_1=125\mu\text{m}$ 、比屈折率差を $\Delta n_1=0\%$ に設定している。

15      【0109】 また、実施例C2及び比較例D2では、光ファイバとして、図5に示した構成を有する分散シフトファイバ (DSF) を想定している。具体的には、Geが添加されたSiO<sub>2</sub>からなるコア領域200の外径を $2r_0=6\mu\text{m}$ 、比屈折率差を $\Delta n_0=[\text{Ge}]=0.6\%$ 、Geが添加されたSiO<sub>2</sub>からなる第1クラッド層211の外径を $2r_1=40\mu\text{m}$ 、比屈折率差を $\Delta n_1=0.1\%$ 、純SiO<sub>2</sub>からなる第2クラッド層212の外径を $2r_2=125\mu\text{m}$ 、比屈折率差を $\Delta n_2=0\%$ に設定している。

20      【0110】 また、実施例C3及び比較例D3では、光ファイバとして、図6に示した構成を有する分散補償ファイバ (DCF) を想定している。具体的には、Geが添加されたSiO<sub>2</sub>からなるコア領域300の外径を $2r_0=4\mu\text{m}$ 、比屈折率差を $\Delta n_0=[\text{Ge}]=1.5\%$ 、Fが添加されたSiO<sub>2</sub>からなる第1クラッド層311の外径を $2r_1=8\mu\text{m}$ 、比屈折率差を $\Delta n_1=-0.4\%$ 、純SiO<sub>2</sub>からなる第2クラッド層312の外径を $2r_2=125\mu\text{m}$ 、比屈折率差を $\Delta n_2=0\%$ に設定している。

25

【0111】 また、その製造条件については、実施例C1～C3では、熱処理炉における光ファイバのアニール温度を1400℃、冷却手段への光ファイバの入線温度を1000℃とする実施例A2（図3参照）での製造条件を用いている。また、比較例D1～D3では、熱処理炉における光ファイバのアニールを行わず、冷却手段への光ファイバの入線温度を1000℃とする比較例B1（図4参照）での製造条件を用いている。また、光ファイバの線速等については、図3及び図4の場合と同様である。なお、実施例C1～C3での光ファイバのアニール条件については、上述した冷却速度を2000℃/秒以下とする条件、及びアニール時間 $L/V_f$ を緩和時間 $\tau$ 以上とする条件を満たすように設定している。

【0112】 また、図7の表には、各実施例及び比較例での光ファイバの損失特性として、波長1.55 $\mu\text{m}$ での伝送損失 $\alpha_{1.55}$ （dB/km）、及び波長1.38 $\mu\text{m}$ での水素処理前後の伝送損失差 $\Delta\alpha_{1.38}$ （dB/km）を示している。ここで、波長1.38 $\mu\text{m}$ での伝送損失差 $\Delta\alpha_{1.38}$ は、図3に示した波長0.63 $\mu\text{m}$ での伝送損失 $\alpha_{0.63}$ と同様に、アニール後の光ファイバの冷却手段での強制冷却等による光ファイバ内での欠陥の低減効果を示している。

【0113】 図7の表に示した実施例C1～C3では、伝送損失はそれぞれ $\alpha_{1.55}=0.180$ 、0.188、0.228となっている。これらの値では、コアに添加されているGeの添加量に応じて伝送損失が増加しているものの、熱処理炉でのアニールによって光ファイバでのレイリー散乱損失が低減されて、レイリー散乱損失を含む波長1.55 $\mu\text{m}$ での伝送損失 $\alpha_{1.55}$ が低減されている。

【0114】 また、伝送損失差はそれぞれ $\Delta\alpha_{1.38}=0.05$ 、0.07、0.11となっている。これらの値では、冷却手段への入線温度の設定等によって光ファイバ内での欠陥が減少されて、欠陥に起因する波長1.38 $\mu\text{m}$ での水素処理前後の伝送損失差 $\Delta\alpha_{1.38}$ が0.15 dB/km以下に低減されている。

【0115】 一方、比較例D1～D3では、伝送損失はそれぞれ $\alpha_{1.55}=0.190$ 、0.200、0.245、また、伝送損失差はそれぞれ $\Delta\alpha_{1.38}=0.$

2、0.3、0.6となっている。これらの値は、いずれも対応する実施例C1～C3での値よりも大きくなっており、光ファイバの損失特性、及び耐水素特性が劣化している。

5 【0116】 以上の実施例C1～C3、及び比較例D1～D3より、熱処理炉による光ファイバのアニール温度を1100℃以上1600℃以下の温度とし、かつ、冷却手段への光ファイバの入線温度を700℃以上の温度とすることにより、図2、図5、及び図6にそれぞれ示した構成を有する光ファイバのいずれにおいても、レイリー散乱損失が低減され、かつ、良好な耐水素特性を有する光ファイバが得られることがわかる。

10 【0117】 図8は、光ファイバの実施例E、及び比較例Fにおける光ファイバの製造時での温度変化について示す表である。この表では、熱処理炉の出口からの距離に対する光ファイバの温度変化(℃)を示している。

15 【0118】 具体的には、実施例E及び比較例Fでは、熱処理炉の入口での光ファイバの温度を1600℃、光ファイバの線速を1200m/分、熱処理炉の長さを2m、アニール温度を1200℃、アニール時間を0.1秒に設定している。また、実施例Eでは、熱処理炉の出口からの距離が2m～3mの範囲において、光ファイバに対してHe冷却手段による強制冷却を行っている。また、実施例E及び比較例Fでは、図2に示した構成を有するGe添加シングルモードファイバを想定している。ガラスファイバの直径は125μmである。また、この条件では、緩和時間τは約0.05秒であり、アニール時間はそれよりも長くなっている。

20 【0119】 また、光ファイバの温度変化については、Paekの式

$$\theta = \exp\{-(4h)/(\rho C_p V)S\}$$

または、この式を書き換えた次式

25 
$$\theta = \exp\{-(4h)/(\rho C_p d)t\}$$

を用いて計算している。ここで、hは熱伝達係数、ρは密度、C<sub>p</sub>は比熱、Vは

光ファイバの線速、 $d$ は光ファイバの直径、 $t$ は経過時間である。

【0120】 また、 $\theta$ 及び $S$ は、次式

$$\theta = (T - T_0) / (T_s - T_0)$$

$$S = z / d$$

5 によって表される。ここで、 $T$ は温度、 $T_s$ は軟化温度、 $T_0$ は雰囲気温度、 $z$ は位置である（文献「U.C.Paek et.al., Journal of The American Ceramic Society Vol.58, No.7-8, pp.330-335」を参照）。

10 【0121】 図8の表において、実施例E及び比較例Fともに、熱処理炉の出口での光ファイバの温度は1499℃、出口から1mでは1299℃、2mでは1125℃となっている。そして、この後段において、He冷却手段によって強制冷却を行っている実施例Eでは、出口から3mで光ファイバの温度が600℃以下の553℃となっているのに対し、強制冷却を行わない比較例Fでは、出口から7mで600℃以下の554℃となっている。

15 【0122】 すなわち、この例では、熱処理炉の後段に冷却手段を設置したことにより、光ファイバの温度を600℃以下まで低減するための線引装置の長さを4m短縮することができ、線引装置を大幅に小型化することが可能となっている。これにより、線引装置の建設費用を低減することができる。また、線引時における光ファイバの線速を高くするなど、光ファイバの生産性を向上することができる。

20 【0123】 このような効果は、特に、線引時における光ファイバの線速が高い場合に顕著となる。例えば、図8に示した例では、線速1200m/分で4mのスペース短縮が可能となっている。このことから、光ファイバの線速が300m/分以上であれば、線引装置のスペースを1m以上短縮することができる。

25 【0124】 また、熱処理炉による光ファイバのアニール時間については、長さ1mの熱処理炉では、光ファイバの線速を300～1800m/分とすれば、アニール時間は0.2～0.03秒となる。また、長さ4mの熱処理炉では、ア

ニール時間は0.8～0.13秒となる。したがって、このような条件では、熱処理炉によるアニール時間を0.03秒以上0.8秒以下とすることが好ましい。

5 【0125】 本発明による光ファイバの製造方法での光ファイバのアニールによる伝送損失の低減効果について、実施例とともにさらに説明する。

10 【0126】 以下に示す実施例においては、光ファイバとして、実施例A1～A4と同様のGe添加シングルモードファイバを想定し、熱処理炉の入口での光ファイバの温度を $T_s = 1500^\circ\text{C}$ とするとともに、光ファイバの線速 $V_f$ 及び熱処理炉の長さ $L$ を変えて、光ファイバの温度変化、冷却速度、及び得られるアニール効果について調べた。この光ファイバの構成及び熱処理炉への入線温度において、光ファイバの緩和時間は $\tau = 0.12$ 秒( $K$ は約80MPa)である。

15 【0127】 また、光ファイバの温度変化については、前述の Paek の式を用いて計算により求め、熱処理炉内の各位置、及び熱処理炉の後段にある冷却手段の入口での光ファイバの温度( $^\circ\text{C}$ )と、それから求められる熱処理炉での冷却速度( $^\circ\text{C}/\text{秒}$ )とを表中に示した。また、アニール効果については、アニールなしの場合と比較してレイリー散乱係数が3%以上低減される場合を効果あり(表中の○)、それ以外を効果なし(表中の×)とした。

20 【0128】 図9は、光ファイバの線速を $V_f = 400\text{m}/\text{分}$ としたときの光ファイバの冷却速度及びアニール効果について示す表である。図9に示す例では、熱処理炉の長さを $L = 2\text{m}$ 、熱処理炉と冷却手段との距離を0.3mに設定し、熱処理炉の設定温度を $1300^\circ\text{C}$ 、 $1000^\circ\text{C}$ 、 $800^\circ\text{C}$ 、 $500^\circ\text{C}$ 、及び $200^\circ\text{C}$ とした各条件について光ファイバの温度変化、及び得られるアニール効果を調べた。このとき、アニール時間は $L/V_f = 0.30$ 秒であり、条件 $L/V_f \geq \tau$ を満たしている。

25 【0129】 図10は、光ファイバの線速を $V_f = 800\text{m}/\text{分}$ としたときの光ファイバの冷却速度及びアニール効果について示す表である。図10に示す例

では、熱処理炉の長さを $L = 2 \text{ m}$ 、熱処理炉と冷却手段との距離を $1.2 \text{ m}$ に設定し、熱処理炉の設定温度を $1300^\circ\text{C}$ 、 $1000^\circ\text{C}$ 、 $800^\circ\text{C}$ 、 $500^\circ\text{C}$ 、及び $20^\circ\text{C}$ とした各条件について光ファイバの温度変化、及び得られるアニール効果を調べた。このとき、アニール時間は $L/V_f = 0.15$ 秒であり、条件 $L/V_f \geq \tau$ を満たしている。

【0130】 図11は、光ファイバの線速を $V_f = 1600 \text{ m/分}$ としたときの光ファイバの冷却速度及びアニール効果について示す表である。図11に示す例では、熱処理炉の長さを $L = 3.5 \text{ m}$ 、熱処理炉と冷却手段との距離を $2 \text{ m}$ に設定し、熱処理炉の設定温度を $1300^\circ\text{C}$ 、 $1000^\circ\text{C}$ 、 $800^\circ\text{C}$ 、 $500^\circ\text{C}$ 、及び $20^\circ\text{C}$ とした各条件について光ファイバの温度変化、及び得られるアニール効果を調べた。このとき、アニール時間は $L/V_f = 0.13$ 秒であり、条件 $L/V_f \geq \tau$ を満たしている。

【0131】 図12は、光ファイバの線速を $V_f = 3000 \text{ m/分}$ としたときの光ファイバの冷却速度及びアニール効果について示す表である。図12に示す例では、熱処理炉の長さを $L = 7 \text{ m}$ 、熱処理炉と冷却手段との距離を $2 \text{ m}$ に設定し、熱処理炉の設定温度を $1300^\circ\text{C}$ 、 $1000^\circ\text{C}$ 、 $800^\circ\text{C}$ 、 $500^\circ\text{C}$ 、及び $20^\circ\text{C}$ とした各条件について光ファイバの温度変化、及び得られるアニール効果を調べた。このとき、アニール時間は $L/V_f = 0.14$ 秒であり、条件 $L/V_f \geq \tau$ を満たしている。

【0132】 図13は、光ファイバの線速を $V_f = 800 \text{ m/分}$ としたときの光ファイバの冷却速度及びアニール効果について示す表である。図13に示す例では、熱処理炉の長さを $L = 1.5 \text{ m}$ 、熱処理炉と冷却手段との距離を $1.2 \text{ m}$ に設定し、熱処理炉の設定温度を $1300^\circ\text{C}$ とした条件について光ファイバの温度変化、及び得られるアニール効果を調べた。このとき、アニール時間 $L/V_f$ は緩和時間 $\tau$ よりも短い $L/V_f = 0.11$ 秒であり、条件 $L/V_f \geq \tau$ は満たされていない。

【0133】 以上の図9～図13に示されているように、アニール時間についての条件 $L/Vf \geq \tau$ が満たされずにアニール時間が短くなっている図13の例では、十分なレイリー散乱係数の低減効果は得られていない。また、アニール時間が条件 $L/Vf \geq \tau$ を満たす図9～図12の例においても、冷却速度が2000℃/秒よりも速い場合には、同様に十分なレイリー散乱係数の低減効果が得られないことがわかる。

【0134】 これに対して、熱処理炉における冷却速度が2000℃/秒以下となる条件、及びアニール時間 $L/Vf$ が緩和時間 $\tau$ 以上となる条件を満たすように光ファイバをアニールすることにより、レイリー散乱係数が十分に低減される。また、熱処理炉の設定温度であるアニール温度については、アニール温度を800℃以上とすることにより、レイリー散乱係数が十分に低減される。なお、これらの例においても、冷却手段によって光ファイバを強制冷却することによる効果については、上述した実施例A1～A4等と同様である。

【0135】 本発明による光ファイバ、及びその製造方法は、上述した実施形態及び実施例に限られるものではなく、様々な変形が可能である。例えば、線引装置の具体的な構成については、図1はその一例を示すものであり、上述した製造方法を実現可能なものであれば、他の構成の線引装置を用いても良い。

#### 産業上の利用可能性

【0136】 本発明による光ファイバ、及びその製造方法は、以上詳細に説明したように、レイリー散乱損失が低減され、かつ、良好な耐水素特性を有する光ファイバ、及び生産性の良い光ファイバの製造方法として利用可能である。すなわち、光ファイバの線引時において、線引炉の後段の熱処理炉によって冷却速度が2000℃/秒以下、アニール時間が緩和時間以上となる条件で光ファイバをアニールするとともに、熱処理炉の後段の冷却手段へと700℃以上の温度で光ファイバを入線して強制冷却を行う光ファイバの製造方法によれば、レイリー散乱損失が低減され、かつ、良好な耐水素特性を有する光ファイバを生産性良く製

造することが可能となる。

- 【0137】 また、コア領域に条件  $[Ge] \geq 0.3\%$  を満たす添加量で  $Ge$  が添加され、レイリー散乱係数  $A$ 、及び波長  $1.00 \mu m$  での伝送損失  $\alpha_{1.00}$  が、それぞれ通常の基準値  $A_0$ 、及び  $\alpha_0$  に対して  $97\%$  以下であり、かつ、波長
- 5  $1.38 \mu m$  での水素処理前後の伝送損失差  $\Delta \alpha_{1.38}$  が  $0.15 dB/km$  以下である光ファイバによれば、レイリー散乱損失が低減され、かつ、良好な耐水素特性を有する光ファイバが得られる。



### 請求の範囲

1. コア領域、及び前記コア領域の外周に設けられたクラッド領域を有する光ファイバ母材を線引炉によって加熱線引して光ファイバとする線引ステップと、

- 5 前記線引炉で線引された前記光ファイバを、前記線引炉の後段に設けられた熱処理炉によってアニールする熱処理ステップと、

前記熱処理炉でアニールされた前記光ファイバを、前記熱処理炉の後段に設けられた冷却手段へと700℃以上の温度で入線し、前記冷却手段によって強制冷却する冷却ステップとを備え、

- 10 前記熱処理ステップにおいて、前記光ファイバの冷却速度が2000℃/秒以下となる条件、及び、前記熱処理炉の長さを $L$  (m)、前記光ファイバの線速を $V_f$  (m/秒)、前記熱処理炉の入口における前記光ファイバの粘度を $\eta_s$  (Pa・秒)、単位断面積当たりの前記光ファイバの張力を $K$  (Pa)とし、緩和時間を $\tau = \eta_s / K$ と定義したときに、アニール時間 $L / V_f$ が緩和時間 $\tau$ 以上となる条件を満たすアニール条件で前記光ファイバをアニールすることを特徴とする光ファイバの製造方法。
- 15

2. 前記熱処理ステップにおいて、前記光ファイバを前記熱処理炉によって800℃以上1600℃以下の温度でアニールすることを特徴とする請求項1記載の光ファイバの製造方法。

- 20 3. 前記熱処理ステップにおいて、前記光ファイバを前記熱処理炉によって1100℃以上1600℃以下の温度でアニールすることを特徴とする請求項1記載の光ファイバの製造方法。

4. 前記冷却ステップにおいて、前記光ファイバを前記冷却手段へと700℃以上1300℃以下の温度で入線することを特徴とする請求項1記載の光ファイバの製造方法。

25

5. 前記線引ステップ、前記熱処理ステップ、及び前記冷却ステップで

の前記光ファイバの線速が300m/分以上であることを特徴とする請求項1記載の光ファイバの製造方法。

- 5 6. 前記熱処理ステップにおいて、前記光ファイバを前記熱処理炉によって0.03秒以上0.8秒以下の時間でアニールすることを特徴とする請求項1記載の光ファイバの製造方法。

7. 前記コア領域は、純SiO<sub>2</sub>に対する%で表した比屈折率差[Ge]が条件[Ge] ≥ 0.3%を満たす添加量でGeが添加されていることを特徴とする請求項1記載の光ファイバの製造方法。

- 10 8. 前記クラッド領域は、それぞれ純SiO<sub>2</sub>、Geが添加されたSiO<sub>2</sub>、またはFが添加されたSiO<sub>2</sub>のいずれかからなる1または複数のクラッド層を有することを特徴とする請求項1記載の光ファイバの製造方法。

9. コア領域と、前記コア領域の外周に設けられたクラッド領域とを備え、前記コア領域は、純SiO<sub>2</sub>に対する%で表した比屈折率差[Ge]が条件[Ge] ≥ 0.3%を満たす添加量でGeが添加されているとともに、

- 15 レイリー散乱係数A (dB/km・μm<sup>4</sup>)、及び波長1.00μmでの伝送損失α<sub>1.00</sub> (dB/km)が、それぞれ次式で表される基準値A<sub>0</sub>、及びα<sub>0</sub>

$$A_0 = 0.85 + 0.29 [Ge]$$

$$\alpha_0 = 0.86 + 0.29 [Ge]$$

- 20 に対して97%以下であり、かつ、波長1.38μmでの水素処理前後の伝送損失差Δα<sub>1.38</sub>が0.15dB/km以下であることを特徴とする光ファイバ。

10. 前記クラッド領域は、それぞれ純SiO<sub>2</sub>、Geが添加されたSiO<sub>2</sub>、またはFが添加されたSiO<sub>2</sub>のいずれかからなる1または複数のクラッド層を有することを特徴とする請求項9記載の光ファイバ。

図1

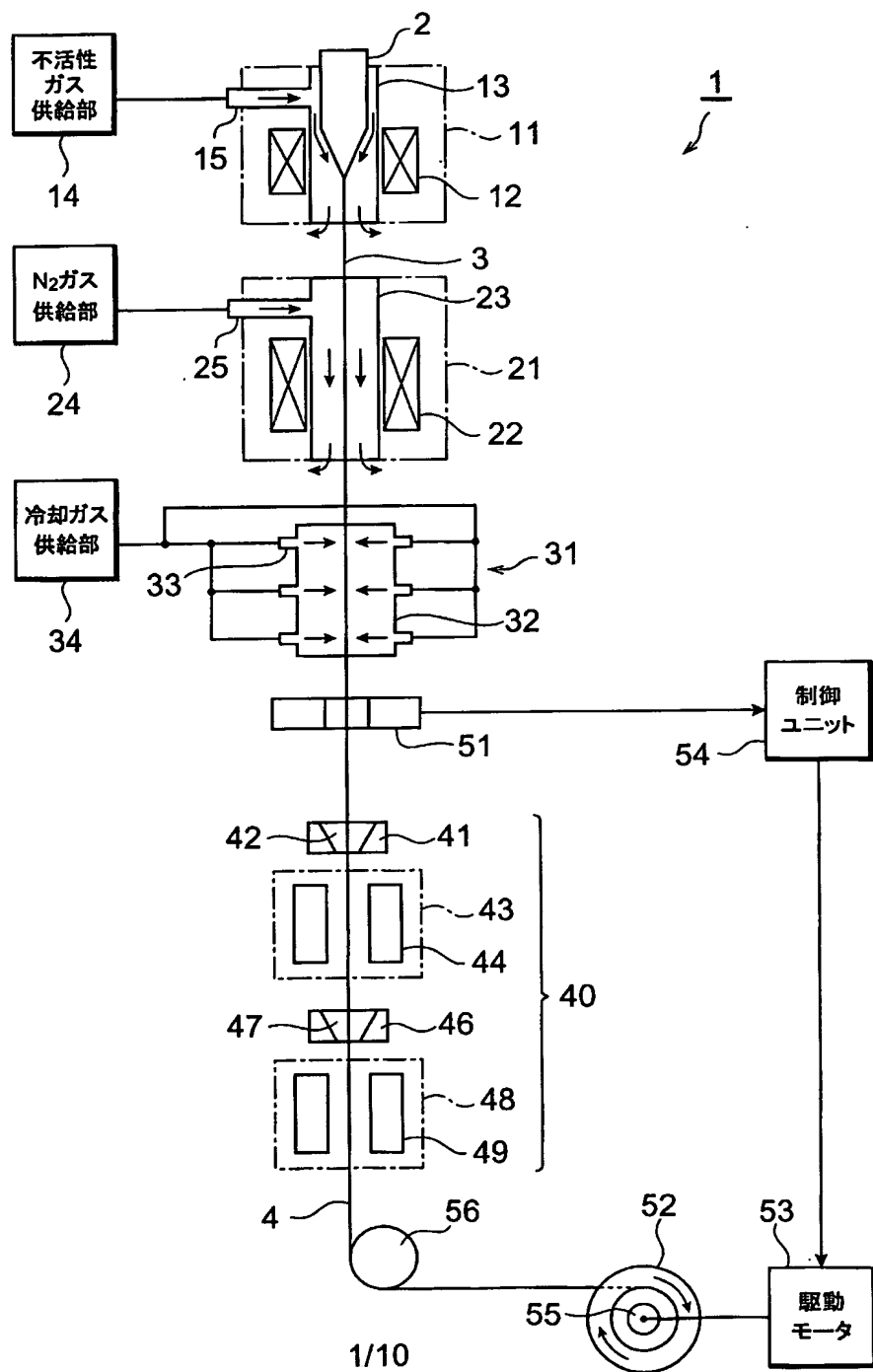


図2

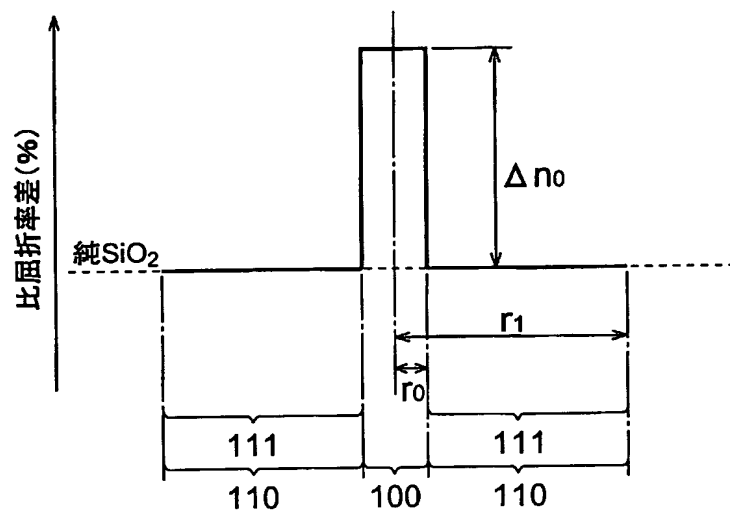


図3

	熱処理炉 アニール温度 (°C)	冷却手段 入線温度 (°C)	伝送損失 @1.55 $\mu$ m (dB/km)	伝送損失 @0.63 $\mu$ m (dB/km)
実施例A1	1100	700	0.185	6
実施例A2	1400	1000	0.180	6
実施例A3	1550	1200	0.182	7
実施例A4	1550	1300	0.182	9

図4

	熱処理炉 アニール温度 (°C)	冷却手段 入線温度 (°C)	伝送損失 @1.55 $\mu$ m (dB/km)	伝送損失 @0.63 $\mu$ m (dB/km)
比較例B1	なし	1000	0.190	12
比較例B2	なし	500	0.190	6
比較例B3	900	500	0.189	6
比較例B4	1100	500	0.185	6
比較例B5	1650	1300	0.188	10

図5

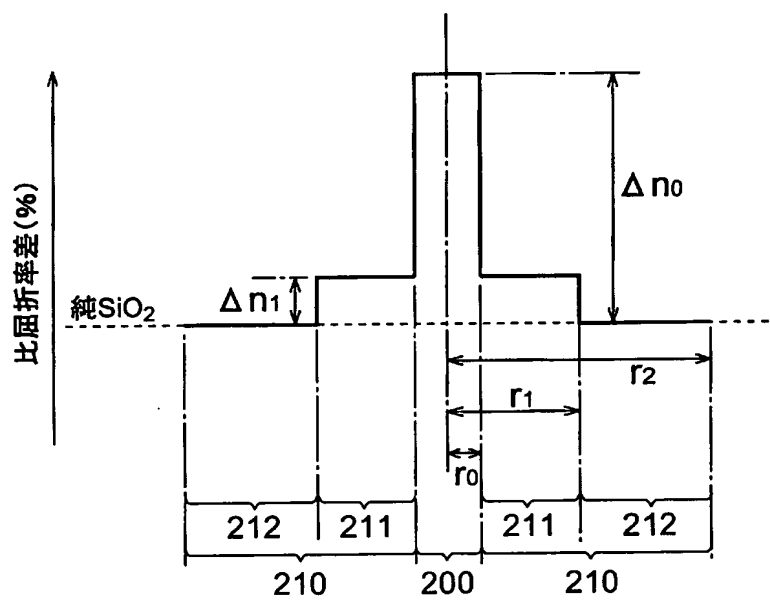


図6

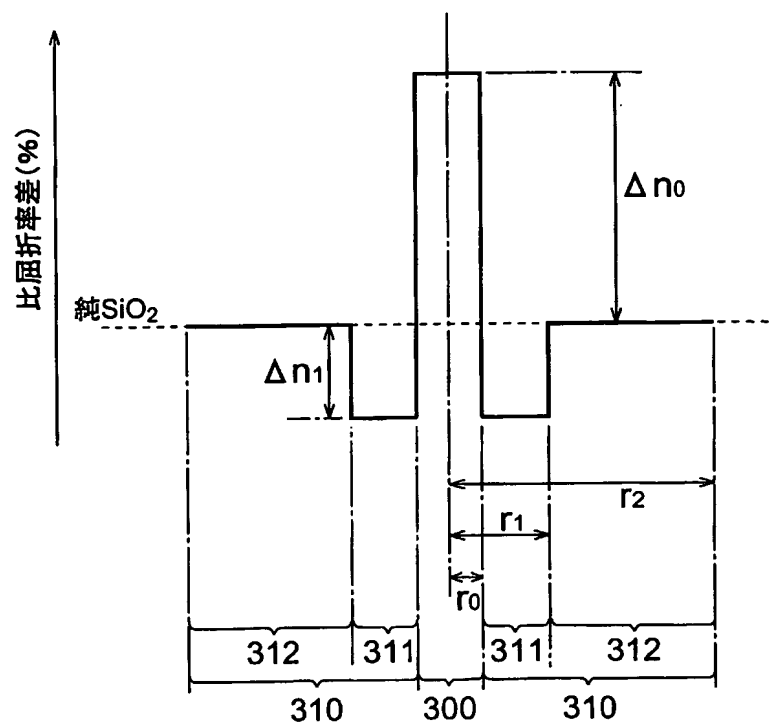


図7

	光ファイバ の種類	コア領域 Ge添加量	伝送損失 @1.55 $\mu$ m (dB/km)	損失増加 $\Delta \alpha$ 1.38 (dB/km)
実施例C1	Ge-SM	$\Delta n_0 =$ 0.35%	0.180	0.05
比較例D1			0.190	0.2
実施例C2	DSF	$\Delta n_0 =$ 0.6%	0.188	0.07
比較例D2			0.200	0.3
実施例C3	DCF	$\Delta n_0 =$ 1.5%	0.228	0.11
比較例D3			0.245	0.6

図8

	熱処理炉 出口	1m	2m	—	3m	4m	5m	6m	7m
実施例E	1499	1299	1125	強制 冷却	553	—	—	—	—
比較例F	1499	1299	1125	—	976	846	736	637	554

(光ファイバの温度:°C)



図9

熱処理炉設定温度(°C)		1300	1000	800	500	20
熱処理炉の入口 からの距離(m)	0	1500	1500	1500	1500	1500
	1	1418	1296	1214	1092	896
	2	1370	1175	1045	850	539
冷却手段の入口		1174	1007	896	729	464
冷却速度(°C/秒)		433.3	1083.3	1516.7	2166.7	3203.3
アニール効果		○	○	○	×	×

Vf=400(m/分)

図10

熱処理炉設定温度(°C)		1300	1000	800	500	20
熱処理炉の入口 からの距離(m)	0	1500	1500	1500	1500	1500
	1	1453	1384	1338	1269	1159
	2	1418	1296	1214	1092	896
冷却手段の入口		1041	952	892	803	660
冷却速度(°C/秒)		546.7	1360.0	1906.7	2720.0	4026.7
アニール効果		○	○	○	×	×

Vf=800(m/分)

図11

熱処理炉設定温度(°C)		1300	1000	800	500	20
熱処理炉の入口 からの距離(m)	0	1500	1500	1500	1500	1500
	1	1475	1438	1414	1377	1318
	2	1453	1384	1338	1269	1159
	3	1435	1337	1272	1175	1019
	3.5	1426	1316	1243	1132	956
冷却手段の入口		1102	1017	961	876	740
冷却速度(°C/秒)		560.1	1400.3	1960.4	2800.5	4144.8
アニール効果		○	○	○	×	×

Vf=1600(m/分)

図12

熱処理炉設定温度(℃)		1300	1000	800	500	20
熱処理炉の入口 からの距離(m)	0	1500	1500	1500	1500	1500
	1	1487	1466	1453	1433	1400
	2	1474	1435	1409	1370	1307
	3	1462	1406	1368	1311	1220
	4	1451	1378	1329	1256	1139
	5	1441	1353	1294	1205	1064
	6	1432	1329	1260	1158	993
	7	1423	1307	1229	1113	928
冷却手段の入口		1240	1139	1071	971	810
冷却速度(℃/秒)		552.3	1380.7	1933.0	2761.4	4086.8
アニール効果		○	○	○	×	×

Vf=3000(m/分)

図13

熱処理炉設定温度(°C)		1300
熱処理炉の入口 からの距離(m)	0	1500
	1	1453
	1.5	1435
冷却手段の入口		1053
冷却速度(°C/秒)		577.4
アニール効果		×

 $V_f=800(\text{m/分})$